

# 관측치를 활용한 동해안 너울성 고파 예측 Prediction of Swell-like High Waves Using Observed Data on the East Coast of Korea

이창훈\* · 안석진\*\* · 이병욱\*\*\* · 김신웅\*\*\*\* · 권석재\*\*\*\*\*

Changhoon Lee\*, Suk Jin Ahn\*\*, Byeong Wook Lee\*\*\*, Shin Woong Kim\*\*\*\* and Seok Jae Kwon\*\*\*\*\*

**요 지:** 본 연구에서는 속초 인근의 파향·파고계로 관측된 파랑 자료를 이용하여 동해안 주요지역에 너울성 고파를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. SWAN 모형을 이용하여 연안의 파랑 관측 자료로부터 고파 발생지로 예상되는 외해지점의 파랑 제원을 추정하였다. 추정된 파랑 제원을 경계조건으로 쓰고 SWAN 모형과 파향선 추적법을 사용하여 동해안 주요지역에서의 너울성 고파를 예측하였다. 왕돌초에서 관측한 파랑 자료를 예측 결과와 비교하여 예측알고리즘의 정확성을 검증하였다. 동해안 실시간 파랑관측 시스템과 본 연구결과를 활용하면 동해안 너울성 고파를 보다 정확하게 예측할 수 있다.

**핵심용어:** 동해 너울성 고파, 파랑 예측 알고리즘, SWAN, 파향선 추적법, 관측치 활용

**Abstract :** In this study, we develop an algorithm to predict swell-like high waves on the east coast of Korea using the directional wave gauge which was installed near Sokcho. Using the numerical wave model SWAN, we estimate wave data in open sea from the wave data collected by using the directional wave gauge. Then, using the wave ray method and SWAN model with the open-sea wave data as offshore boundary conditions, we predict the swell-like high waves at several major points on the east coast of Korea. We verify the prediction methods with the SWAN and wave ray methods by comparing predicted data against measured one at Wangdolcho. We can improve the prediction of the swell-like high waves in the east sea of Korea using both the real-time wave measurement system and the present prediction algorithm.

**Keywords :** East Sea swell-like high wave, wave prediction algorithm, SWAN, wave ray approach, use of observed data

## 1. 서 론

최근 몇 년간 우리나라 동해안에서는 동계 너울성 고파에 의한 인명 및 재산피해가 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 너울성 고파는 중국 내륙 및 우리나라 부근에서 강하게 발달한 온대성 저기압이 동해로 진출하여 강한 바람과 함께 생성된 폭풍파가 동해안까지 내습하여 발생하는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2007; Jeong et al., 2008). 너울성 고파는 침두주기 9초 이상의 장주기파로, 전파과정에서 발생하는 에너지 감쇠가 풍파에 비해 작아 먼 곳까지 전파한다. 너울성 고파는 먼 곳에서 성장하여 이동하므로 우리나라 연안의 기상 조건과 관계없이 발생하여 예측이 어렵고, 이로 인하여 인명 및 재산피해가 크게 발생하고 있다. 2005년 이후 동해안 너울성 고파의 내습으로 인한 연평균 재산 피해규모는 백억원을 상회하며, 해상 및 해안에서 사망·실종된 사람

은 70여명에 달한다(Jeong and Oh, 2009; Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2012).

동해안 너울성 고파 발생에 관해서는 이미 오래 전부터 인식되어 왔으며(Goda and An, 1973), 최근 너울성 고파에 의한 인명 및 재산피해가 급증함에 따라 관련 연구가 활발하게 수행되고 있다. Oh et al.(2010)은 관측자료를 이용하여 너울성 고파의 특성을 분석하였으며, 너울성 고파의 발생역을 추정하는 방법을 제안하였다.

너울성 고파로 인한 피해를 저감시키기 위해서는 연안에서 파고, 주기, 파향을 상시 관측하는 시스템을 설치하여 관측자료를 축적하고, 축적된 관측자료를 DB화 하여 너울성 고파를 예측하는 시스템이 필요하다. 국립해양조사원에서는 속초 동방등표 인근 수심 18 m 지점에 AWAC(Acoustic Wave And Current) 관측장비를 설치하고 2012년 10월부터 유의파고, 침두주기, 침두파향, 유속뿐만 아니라 주파수 스펙트럼과 방향

\*세종대학교 건설환경공학과 교수 (Sejong University)

\*\* (주)지오시스템리서치 차장 (GeoSystem Research Corporation)

\*\*\*세종대학교 건설환경공학과 박사과정 (Sejong University)

\*\*\*\* (주)지오시스템리서치 대리 (GeoSystem Research Corporation)

\*\*\*\*\*국립해양조사원 해양과학조사연구실 연구관 (Corresponding author: Seok Jae Kwon, Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Busan, 606-806, Korea, Tel: +82-51-400-4360, Fax: +82-51-400-4195, sj79kwon@korea.kr)

스펙트럼을 실시간으로 관측 및 전송하고 있다. AWAC는 초음파의 도플러 효과를 이용한 관측장비로서 Nortek사에서 개발하였다.

너울성 고파는 통상적으로 우리나라 동해안 북동측 해역에서 생성되어 전파한다. 따라서 우리나라 동해안 북측에 가장 먼저 도달하며, 시간차를 가지고 동해안 전역으로 전파한다. 국립해양조사원에서는 우리나라 동해안 북측의 속초에서 너울성 고파를 관측하여 동해안 주요 지점에서 너울성 고파의 유의파고, 침두주기, 침두파향, 도달시간을 예측하는 알고리즘을 개발하였다(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2012; Ahn et al., 2013). 관측자료를 이용하여 외해 너울성 고파를 추정하고, 파향선 추적법을 이용하여 동해안 주요지점에서 너울성 고파를 실시간으로 예측하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2012)과 Ahn et al.(2013)이 제시한 외해 너울성 고파 추정 알고리즘의 정밀도를 향상시키고, 우리나라 동해안 북측의 속초에서 너울성 고파를 관측하여 동해안 주요 지점으로 전파된 너울성 고파의 유의파고, 침두주기, 침두파향, 도달시간을 예측하는 알고리즘을 개선하였다(Fig. 1 참조). 속초(Fig. 1에서 DETECTING SITE)에서 실시간으로 관측된 파랑 자료로부터 너울성 고파를 감지하면 수치모형을 이용해 외해 파랑제원을 추정하고, 추정된 외해 파랑 정보로부터 동해안 주요지점에서 발생할 너울성 고파를 예측한다. 유의파고와 침두파향은 SWAN(Booij et al., 1999) 수치모형을 써서 예측하고, 도달시간은 파향선 추적법(Fig. 1에서 WAVE RAY) (Munk and Arthur, 1952)을 사용하여 예측한다. 본 연구의 예측법을 검증·보완하기 위하여 예측치를 왕돌초(Fig. 1에서 VERIFYING SITE)에서 관측된 파랑 자료와 비교하였다.

제2장에 SWAN 모형 결과를 써서 상관성 분석을 하여 연안 관측 값으로부터 외해 너울성 고파를 역으로 추정하는 방법을 제시하였다. 제3장에 SWAN 모형과 파향선 추적법을 이용하여 동해안 주요 지점에서 너울성 고파를 실시간 예측하는 방법을 제시하였다. 제4장에서 속초의 AWAC 관측자료와 왕돌초의 관측자료를 활용하여 본 연구의 예측 알고리즘을 적

용 및 검증하였다. 제5장에 연구내용을 정리하고, 향후 연구 과제를 제시하였다.

## 2. 외해 너울성 고파 추정

너울성 고파 발생 유무를 판단하기 위한 파랑 관측은 파랑의 굴절, 천수, 반사, 회절, 쇄파 등의 영향이 없는 심해에서 수행되어야 하지만 대부분의 파랑관측은 기기유실의 문제점, 보수의 편의성 등으로 연안에서 수행되고 있다. 연안에서 관측된 너울성 고파를 다른 지역의 너울성 고파 예측에 이용하게 되면 파고, 파향 등의 계산에서 큰 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 모델 영역을 심해까지 확장하고, 파랑의 굴절, 천수, 반사, 회절, 쇄파, 비선형 현상 등을 고려한 다방향 불규칙파 전파모형인 SWAN을 이용하여 다양한 심해 파랑 조건에서 관측지점의 결과를 도출하였다. 이를 이용하여 유의파고, 침두파향의 심해와 관측지점 간의 상관관계를 찾아 DB를 구축하였다. 이 관계를 이용하여 관측지점에서의 파랑 제원으로부터 너울성 고파 발생지점의 파랑제원을 역으로 추정하였다.

### 2.1 파랑변형 수치실험

외해 파랑제원 추정을 위한 수치모델로는 SWAN(Booij et al., 1999)을 사용하였다. SWAN (Simulating WAve Nearshore)은 네덜란드 Delft 공대에서 개발한 3세대 파랑변형 수치모형으로 파랑에너지의 천수, 굴절, 회절, 흐름의 영향, 바람에 의한 에너지 생성, 백파, 쇄파 등에 의한 에너지감쇠, 파랑간의 4차 비선형 현상, 바닥의 마찰 등을 모의할 수 있다. 지배방정식으로 다음과 같은 파작용 평형방정식(wave action balance equation)을 사용한다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(C_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{s}{\sigma} \quad (1)$$

위 식에서  $N = S(f, \theta)/\sigma$ 은 파작용 밀도이고,  $S(f, \theta)$ 는 방향 스펙트럼밀도이고,  $\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$ 는 흐름의 속도  $\vec{U}$ 로 움직이는 좌표에서의 각파수이고,  $C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta$ 는 각각  $x, y, \sigma$ ,

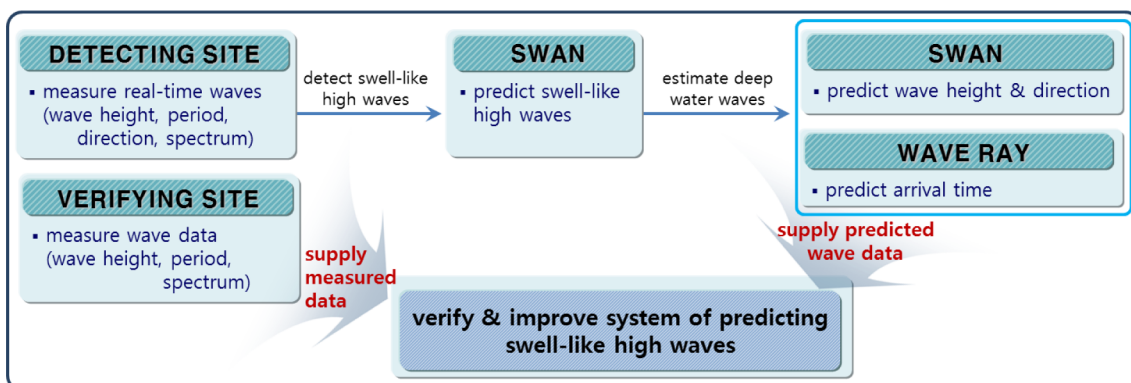


Fig. 1. Flowchart of predicting swell-like high waves.

$\theta$ 공간에서의 위상속도이고,  $s$ 는 파작용밀도의 생성, 소멸, 파랑간의 상호작용에 따른 원천항이다.

관측장비 설치위치는 속초 인근 동방등표에서 남동측으로 약 50 m 이격된 지점으로 관측수심은 약 D.L.(-)18.0 m이다. 파랑 변형 실험은 외해 측 경계가 심해조건이 되도록 속초항을 중심으로 25 km × 31 km 영역에 대해 최소 격자간격 20 m의 가변격자를 구성하여 수행하였다. 계산영역의 경계에 심해파 조건으로 다음과 같은 방향스펙트럼을 사용하였다.

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (2)$$

위 식에서  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼으로 본 연구에서는 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다. JONSWAP 스펙트럼은 유의파고  $H_s$ , 첨두주기  $T_p$ , 첨두신장인자(peak enhancement factor)  $\gamma$ 를 매개변수로 하여 다음과 같이 표현된다.

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (3)$$

여기서

$$\beta_j = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)} (1.094 - 0.01915 \ln \gamma) \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & f \leq f_p \\ 0.09, & f \geq f_p \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = 1 \sim 7 \quad (6)$$

식 (2)에서  $G$ 는 방향분산함수로서 다음과 같이 표현되는 Mitsuyasu et al.(1975)의 것을 사용하였다.

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_p}{2}\right) \quad (7)$$

여기서  $G_0$ 는 방향분산함수의 최대값이고,  $s$ 는 방향분산매개변수로서 다음과 같다.

$$G_0 = \left[ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_p}{2}\right) d\theta \right]^{-1} \quad (8)$$

$$s = \begin{cases} s_{\max}(f/f_p)^5, & f \leq f_p \\ s_{\max}(f/f_p)^{-2.5}, & f \geq f_p \end{cases} \quad (9)$$

Oh et al.(2010)은 너울성 고파를 파고 3 m 이상, 주기 9초 이상의 파로 정의하였다. Suh et al.(2010)은 우리나라 부근 심해에서 고파랑을 관측 또는 추산하여 첨두신장인자가 평균 2.14이고 대부분 4 이하로 분포함을 보였다. 본 연구에서 심해 너울성 고파의 제원으로 유의파고는  $H_s = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0$  m로 7가지, 첨두주기는  $T_p = 8, 10, 12, 15$  초로 4가지, 첨두파향은  $\theta_p = N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S$ 로 9가지, 첨두신장인자는  $\gamma = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ 으로 4가지를 이용하여 총 1,008 가지 경우에 수치실험을 수행하여 Ahn et al.(2013)의 외해 너울성 고파의 추정보다 정밀도를 높

였다. 방향분산매개변수는 장주기파에 적합한  $S_{\max} = 30$ 을 사용하였다. 수심도를 Fig. 2에 도시하였다. 해안선 가까운 해역에서 등수심선이 해안선과 나란한 NNW ↔ SSE 방향으로 분포하였다. 만약 너울성고파가 ENE 방향에서 전파하면 굴절이

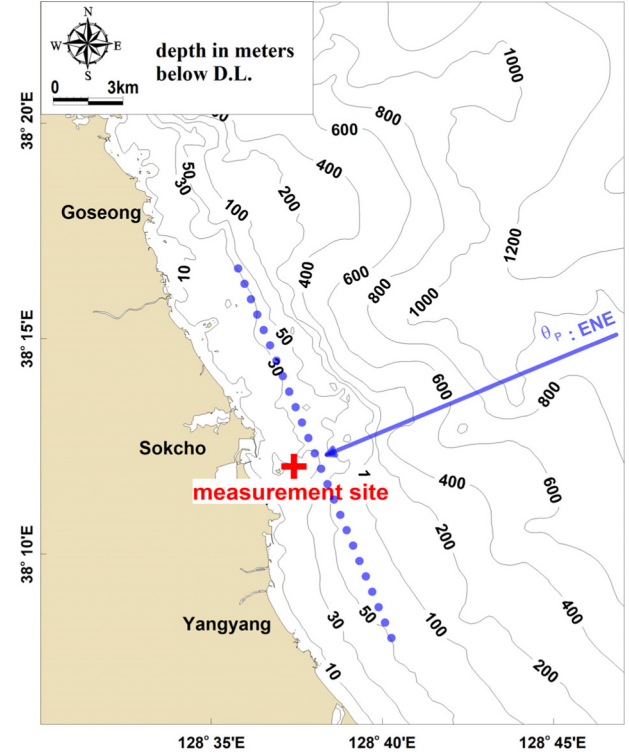


Fig. 2. Water depth contours.

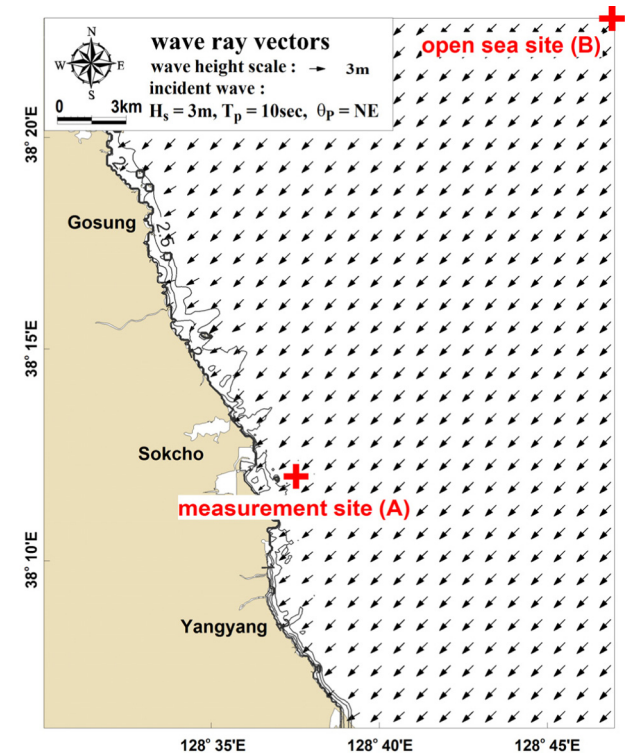


Fig. 3. Wave ray vectors (open sea condition:  $H_s = 3$  m,  $T_p = 10$  sec,  $\theta_p = NE$ ,  $\gamma = 1.0$ ).

거의 발생하지 않으면서 해안선 가까이 도달할 것이다.

외해(Fig. 3의 B 지점)에서 유의파고가  $H_s = 3\text{ m}$ , 침두주기가  $T_p = 10\text{ 초}$ , 침두파향이  $\theta_p = \text{NE}$ , 침두신장인자가  $\gamma = 1.0$ 인 경우에 계산된 파랑 벡터도를 Fig. 3에 도시하였다. 침두파향은 해안선 가까이에서도 거의 변하지 않았다. 이는 동해안의 해안선이 NNW 방향에서 SSE 방향으로 거의 직선으로 이어져 있어서 등수심선의 직각 방향이 침두파향(즉, NE 방향)과 유사하여 파향의 변화가 거의 나타나지 않았기 때문이다. 외해에서부터 해안선 방향으로 수심 30 m 지점까지 유의파고가 3 m이었다가 관측지점 인근에서 천수 현상으로 파고가 증가하고, 다시 해안선에 접근해서는 쇄파로 인하여 파고가 감소하였다.

## 2.2 관측지점과 외해지점간의 파랑제원 상관성 분석

파랑변형 실험을 통해 속초의 관측장비 설치지점(A)과 외해 지점(B)간 파랑제원의 상관성 분석을 수행하였다. 임의의 파가 내습하는 것으로 가정하여 외해 경계조건을 설정하고, 관측지점까지 계산한 뒤 관측지점의 파랑 정보로부터 외해 파

랑제원을 역으로 추정하였다. 설정치 사이의 값은 선형 내삽하여 추정하고, 설정 범위를 벗어나는 경우 선형 외삽하여 추정하였다.

Fig. 4에  $\gamma = 1.0$ 인 경우 A, B 지점 사이의 유의파고의 상관관계를 도시하였다. 침두주기가 길수록 관측지점에서 천수의 영향으로 유의파고가 증가하는 경향이 나타났다. 수심  $h = 18\text{ m}$ 의 관측지점에서 침두주기가 각각  $T_p = 8, 10, 12, 15$  초의 경우 천수계수는  $K_s = 0.91, 0.92, 0.95, 1.02$ 이다. 또한 파랑이 외해에서부터 설치지점으로 전파하는 과정에서 굴절의 영향이 작게 나타나는 파향일수록 유의파고가 크게 나타났다. 예를 들어, 침두파향이  $\theta_p = \text{N}$  방향인 경우 굴절이 아주 크게 발생하기 때문에 관측지점에서의 유의파고가 크지 않다. 반면 침두파향이  $\theta_p = \text{ENE}$  방향인 경우 굴절이 작게 발생하기 때문에 관측지점에서의 유의파고는 크다.

Fig. 5에  $\gamma = 1.0$ 인 경우 A, B 지점 사이의 침두파향의 상관관계를 도시하였다. 관측지점에서의 파향은 굴절의 영향으로 해안선에 직각인 방향으로 집중되었다. 파향이 N~NE 사

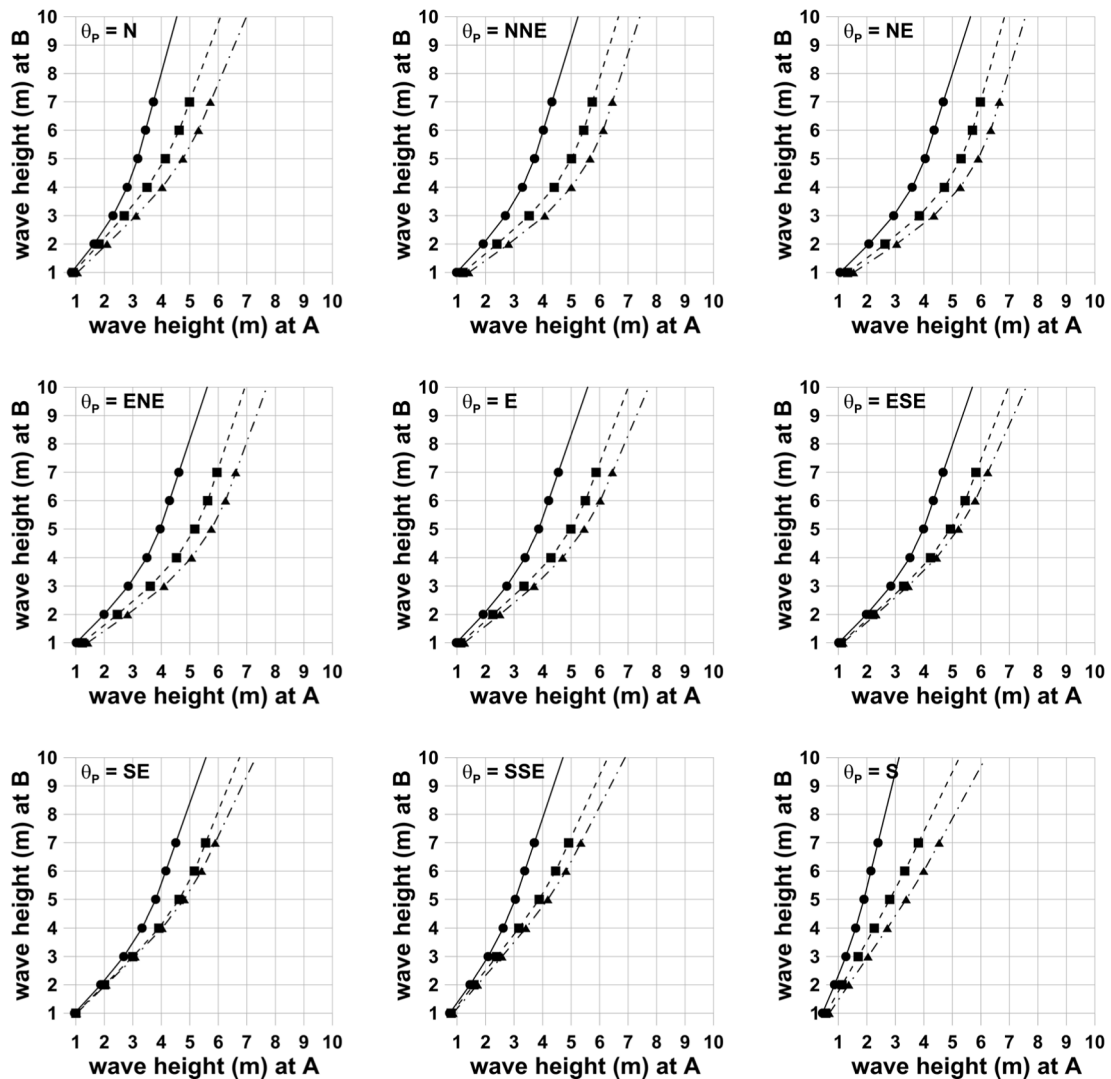


Fig. 4. Relation of significant wave heights between points A and B ( $\gamma = 1.0$ ); solid line:  $T_p = 8\text{ sec}$ , dashed line:  $T_p = 12\text{ sec}$ , dash-dotted line:  $T_p = 15\text{ sec}$ .

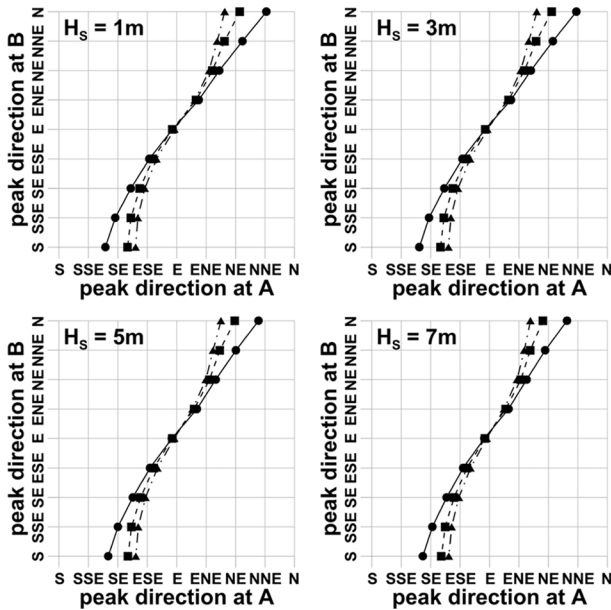


Fig. 5. Relation of peak directions between points A and B ( $\gamma = 1.0$ ); solid line:  $T_p = 8$  sec, dashed line:  $T_p = 12$  sec, dash-dotted line:  $T_p = 15$  sec.

이인 파랑은 첨두주기가 증가할수록 ENE 파향으로 수렴하며, E~S 사이인 파랑은 첨두주기가 증가할수록 ENE 파향으로 수렴한다. 이는 주기가 길수록 굴절의 영향을 먼저 받기 때문이다. 또한, 파고가 클수록 굴절의 영향이 아주 미세하게 더 크게 나타났다.

첨두신장인자가 클수록 굴절의 영향이 미세하게나마 더 크게 나타났다. 첨두신장인자가 크면 첨두주기 주위 성분의 에너지밀도가 증가하는 반면 첨두주기를 기준으로 고·저 주파수 성분이 모두 감소한다. 그런데 고주파수 성분보다 저주파수 성분의 에너지밀도가 덜 감소하여 저주파수(즉, 장주기) 성분에 의한 굴절이 더 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

### 2.3 외해 너울성 고파 추정

앞서 수행한 관측지점과 외해지점의 파랑 상관성 분석결과를 이용하여 관측위치의 파랑제원으로 부터 외해 너울성 고파 발생 지점의 파랑제원을 추정하였다. 추정 시 첨두주기와 첨두신장인자는 관측지점과 외해 지점에서 동일한 것으로 가정하였다. 외해 너울성 고파 제원을 추정하는 과정은 다음과 같다.

- ① 관측지점의 수면변위 시계열이 주어지면 스펙트럼 분석을 통하여 유의파고, 첨두파향, 첨두주기를 구한다.
- ② 관측된 스펙트럼을 JONSWAP 스펙트럼으로 가정한다. 첨두신장인자를 바꿔가면서 추정된 JONSWAP 스펙트럼밀도와 관측된 스펙트럼밀도의 절대오차의 제곱합이 최소가 될 때의 최적의 첨두신장인자를 찾는다.
- ③ 관측지점의 유의파고를 외해지점의 유의파고로 가정하여 관측지점의 첨두파향에 대응되는 외해지점의 첨두파향을 추정한다(예를 들어,  $\gamma = 1.0$ 인 경우 Fig. 5 이용).
- ④ 추정된 외해지점의 첨두파향을 이용하여 관측지점의 유의파고에 대응되는 외해지점의 유의파고를 추정한다(예를 들어,  $\gamma = 1.0$ 인 경우 Fig. 4 이용).
- ⑤ 추정된 외해지점의 유의파고를 이용하여 관측지점의 첨두파향에 대응되는 외해지점의 첨두파향을 추정한다(예를 들어,  $\gamma = 1.0$ 인 경우 Fig. 5 이용).
- ⑥ 추정된 유의파고와 첨두파향이 관측된 유의파고와 첨두파향과의 오차가  $10^{-10}$  이하로 충분히 작으면 추정과정을 마친다. 오차가 작지 않으면 오차가 충분히 작을 때까지 ④, ⑤의 과정을 반복하여 수행한다.

이와 같은 외해 너울성 고파 추정 방법의 적정성을 검토하였다. 먼저 관측지점에서 임의의 파랑제원을 설정한 뒤 이를 근거로 외해 너울성 고파를 추정하였다. 그리고 이 추정값을 경계조건으로 하여 SWAN 모형을 사용하여 관측지점의 파랑제원을 계산하고, 계산값과 설정값 사이의 상대오차를 비교하였다.

검증에 이용한 파랑은 2013년 2월 18일 15시에 속초에서 관측된 것으로, 유의파고는  $H_s = 3.24$  m, 첨두주기는  $T_p = 12.33$  초, 첨두파향은  $\theta_p = N52.8^\circ E$ , 첨두신장인자는  $\gamma = 1.17$ 이다. 관측지점에서 설정된 파랑 제원과 외해지점에서 추정된 파랑 제원을 Table 1에 제시하였다. 추정된 외해 파랑의 유의파고는 3.17 m로 관측위치에서 보다 다소 작게 나타났다. 추정된 외해파랑을 SWAN 모형의 경계조건으로 사용하여 관측지점에서의 유의파고, 첨두파향, 첨두신장인자를 산정하였고, 초기 관측자료와 비교하여 Table 2에 제시하였다. 유의파고의 경우 관측된 자료를 기준으로 하여 4.0% 크게, 첨두파향은 2.8% 작게 나타났다. 첨두신장인자는 11.1% 크게 나타나 오차가 커 보이지만 스펙트럼 에너지밀도의 상대오차는 2.2%로 나타나 본 연구의 외해 너

Table 1. Target values at Sokcho and estimated values at open site on 15:00 Feb. 18, 2013

target at Sokcho				estimated at open site			
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta_p$	$\gamma$	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta_p$	$\gamma$
3.24	12.33	N52.8°E	1.17	3.17	12.33	N34.4°E	1.17

Table 2. Target and predicted waves, and error at Sokcho on 15:00 Feb. 18, 2013

target			result by SWAN			percent error		
$H_s$ (m)	$\theta_p$	$\gamma$	$H_s$ (m)	$\theta_p$	$\gamma$	$H_s$ (m)	$\theta_p$	$\gamma$
3.24	N52.8°E	1.17	3.37	N51.3°E	1.30	4.0	-2.8	11.1



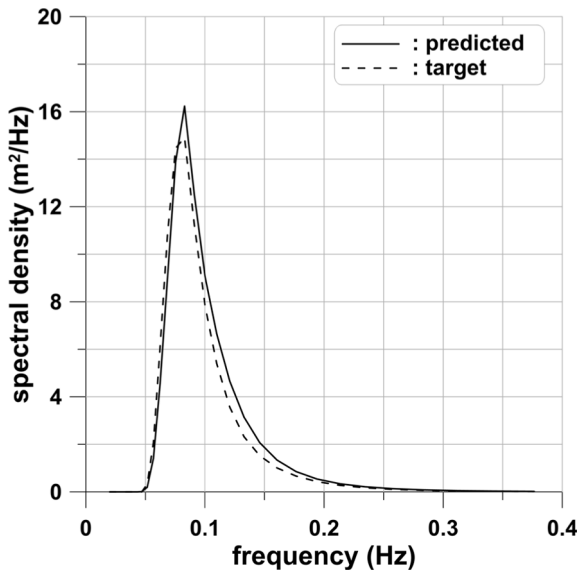


Fig. 6. Predicted and target spectra at Sokcho on 15:00 Feb. 18, 2013.

울성 고파 추정 방법에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 관측된 임의 파랑의 스펙트럼과 재산정한 관측위치에서의 모델 스펙트럼 결과를 비교하여 Fig. 6에 도시하였다.

### 3. 동해안 주요지역 너울성 고파 예측

본 장에서는 제2장에서 추정된 외해의 파랑정보를 이용하여 동해안 주요지역의 너울성 고파 예측방법을 제시하였다. 외해의 파랑정보는 유의파고, 첨두주기, 첨두파향을 사용한다. 주요지역의 예측 파랑정보는 유의파고, 첨두주기, 첨두파향, 도달시간(즉, 속초 동방등표에서 관측된 파랑이 동해안 주요지역에 도달하는 시간)이 있다. 동해안 주요지역으로 과거에 너울성 고파의 피해가 있었던 강릉, 동해, 영덕, 포항, 울산을 정하였다. 주요지역의 고파 예측지점으로 각 지역의 방파제로부터 외해 방향으로 동쪽 또는 북쪽으로 떨어진 수심 20 m 지점을 선택하였다.

본 연구에서 이용한 알고리즘은 SWAN 모형의 예측 결과를 DB화하여 너울성 고파의 관측과 동시에 주요지점에서 발생 할 유의파고, 첨두주기, 첨두파향을 제시하고 1분 이내로 결과 도출이 가능한 파향선 추적법(Munk and Arthur, 1952)을 이용하여 도달시간을 제시하도록 하였다. Ahn et al.(2013)의 방법과는 다르게 SWAN모형을 이용한 DB구축을 통해 유의파고, 첨두주기, 첨두파향 등 실시간 예측 파랑정보의 정확도를 향상시켰다. 도달시간을 예측하는 Munk and Arthur의 방법이 Ahn et al.(2013)에 상세히 설명되어 있다.

제2.3절에서 추정된 외해 너울성 파랑 정보를 이용하여 동해 주요연안에 전파될 파랑을 예측하였다. 앞서 추정된 외해 파랑의 유의파고는  $H_s = 3.17$  m, 첨두주기는  $T_p = 12.33$ 초, 첨두파향은  $\theta_p = N34.4^\circ E$ , 첨두신장인자는  $\gamma = 1.17$ 이다. 파향선 추적법을 이용하여 앞서 추정된 파랑이 동해안 주요 지점인

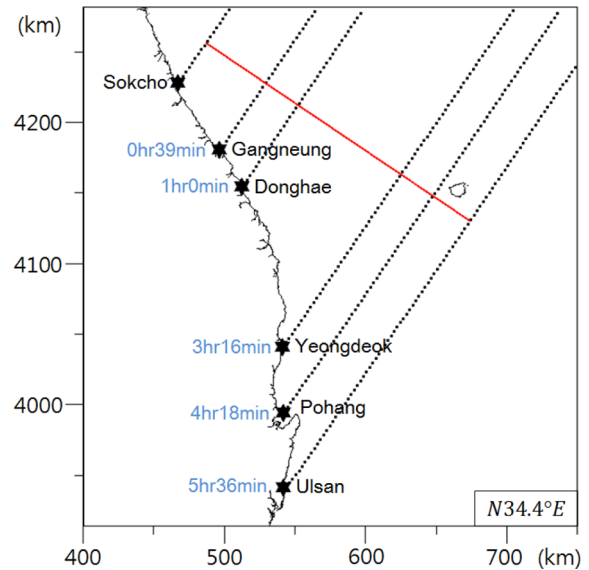


Fig. 7. Difference in arrival time of swell-like high waves between Sokcho and several points on the coast of East Sea for waves measured on 15:00 Feb. 18, 2013.

강릉, 동해, 영덕, 포항, 울산까지 도달하는데 걸리는 시간을 파봉선(실선) 및 파향선(점선)과 함께 Fig. 7에 도시하였다. 강릉과 동해의 도달시간은 39분과 1시간으로 다소 짧지만 너울성 고파 관측 후 예측까지 걸리는 시간이 1분 이내이므로 충분한 대비시간을 확보할 수 있을 것이다. SWAN 모형을 사용하면 도달시간 외에 유의파고와 첨두파향 등의 정보를 얻을 수 있으며 제4.3절에 실제 파랑 관측 시계열을 이용한 예측 결과의 예시를 제시하였다.

## 4. 너울성 고파 예측 알고리즘 적용 및 검증

### 4.1 관측 자료 분석

너울성 고파 관측과 외해 너울성 고파 추정에는 국립해양조사원의 속초 동방등표 인근 AWAC 파랑관측 자료를, 추정된 외해 너울성 고파를 이용한 너울성 고파 예측 시스템의 검증에는 국립해양조사원의 왕돌초 해양 관측소에서 관측된 파랑 자료를 사용하였다. 관측 위치를 Fig. 8에 제시하였다.

국립해양조사원에서는 2012년 10월부터 속초 동방등표 인근에서 AWAC 관측 장비를 활용하여 유의파고, 첨두주기, 첨두파향 뿐만 아니라 주파수 스펙트럼, 방향 스펙트럼 등 다양한 파랑 정보를 실시간 관측하고 있다. 속초 AWAC 관측 위치 및 수심을 Table 3에 제시하였다. AWAC 관측 위치에서 남서쪽으로 약 50 m 이격된 지점에서 속초 동방등표가 위치한다.

동해안의 너울성 고파는 주로 동계에 발생하므로 2012년 10월 25일부터 2013년 10월 31일 사이의 속초 AWAC 파랑 관측자료를 분석하였다. 관측 기간 동안 유의파고는 대체로  $H_s = 2$  m 이내이고, 첨두주기가  $T_p = 10$ 초 이내로 관측되었다. 관측된 유의파고, 첨두주기의 시계열을 Fig. 9에 도시하였다. 너울성 고파 예측 알고리즘의 적용은 관측기간 중 유의파고

$H_s = 3$  m, 침두주기  $T_p = 9$  초 이상으로 너울성 고파의 내습으로 판단되는 11월 1일경, 2월 8일경, 3월 20일경, 4월 6일경, 10월 15일경 총 5개 사상을 대상으로 하였다. 각 사상별 최대 유의파고가 관측된 시점은 11월 1일 12:40경, 2월 8일 15:00경, 3월 20일 15:20경, 4월 6일 21:00경, 10월 15일 10:40경이다.

왕돌초 해양 관측소는 수심이 DL(-)15.5 m로 후포항 동측 약 25 km 지점에 남북 방향으로 길게 돌출된 수중 암초 위에 있다. 왕돌초 해양 관측소에서는 20분 간격으로 유의파고와 침두주기를 관측하며, 파향은 관측하지 않는다. 속초 AWAC 관측 자료를 통하여 선정된 5개 사상에 관측된 왕돌초 파랑 관측 자료를 속초 파랑관측자료와 사상별로 비교하여 Fig. 10에 제시하였다.

각 사상별 유의파고의 최대값은 속초에서 먼저 발생하고 이후 왕돌초에서 나타난다. 이는 북동 측에서 내습하는 파랑이

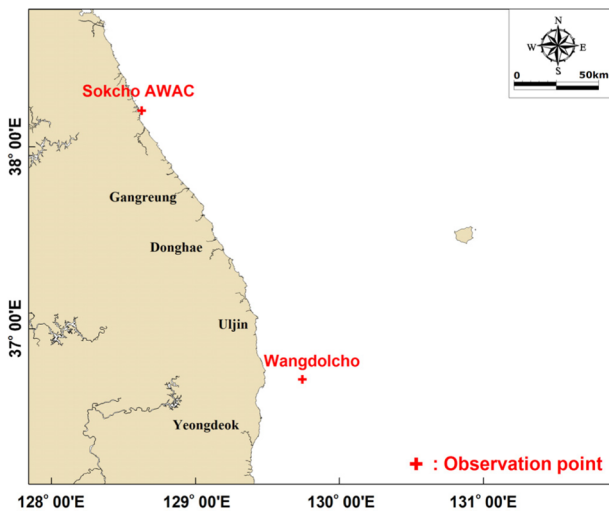


Fig. 8. Map of wave measurement stations.

Table 3. Information of measurement sites at Sokcho and Wangdolcho

site	location	water depth
Sokcho	38°11'57.5"N / 128°37'23.6"E	D.L.(-)17.5 m
Wangdolcho	36°42'36.0"N / 129°44'24.0"E	D.L.(-)15.5 m

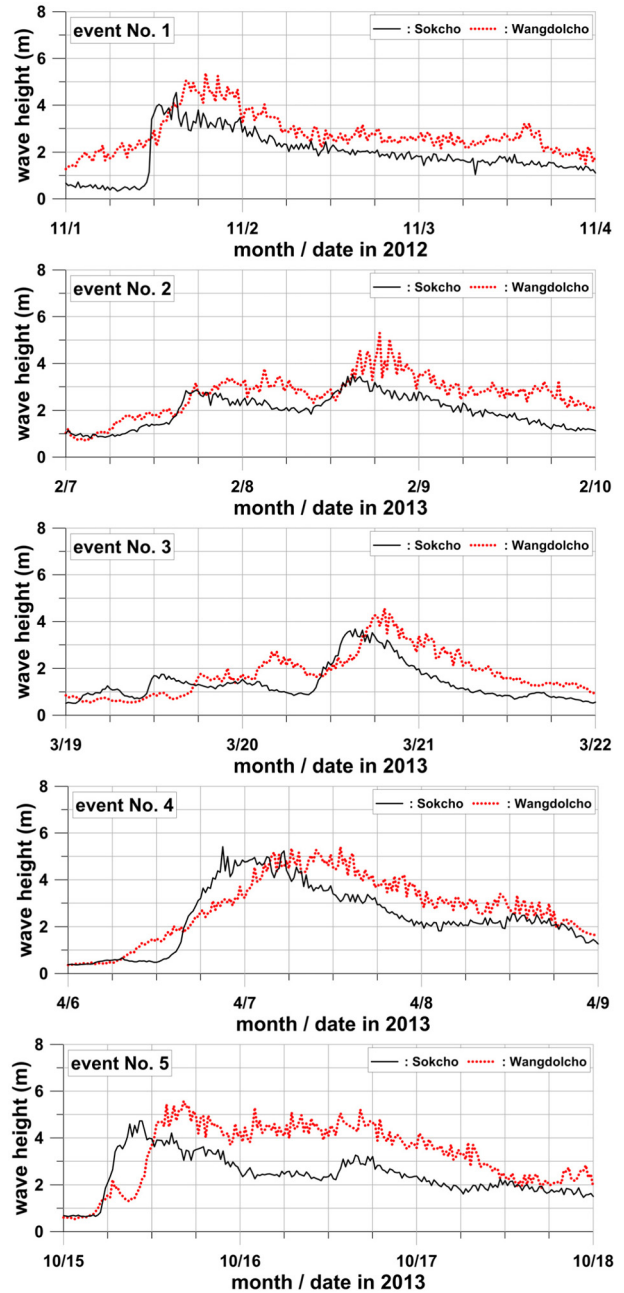


Fig. 10. Time series of significant wave heights measured at Sokcho and Wangdolcho.

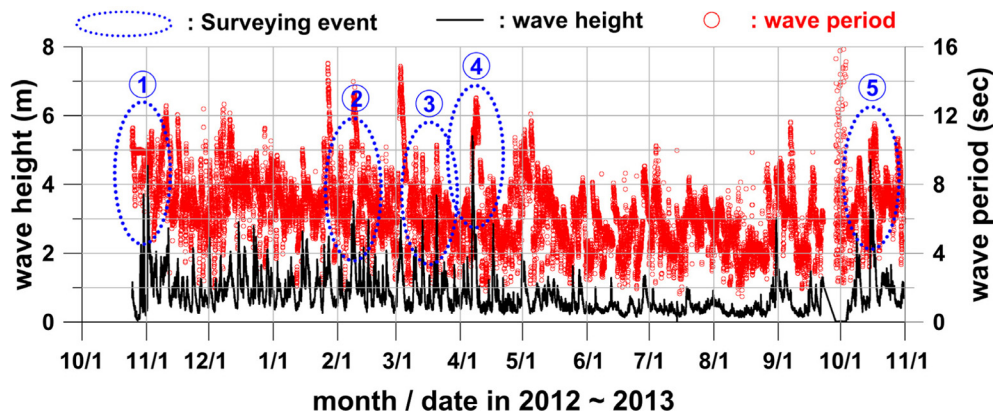


Fig. 9. Time series of significant wave height and peak period measured with AWAC at Sokcho.

북측에 위치한 속초에 먼저 도달하고 이후 보다 남측에 위치한 왕돌초에 순차적으로 전파하기 때문이다.

#### 4.2 외해 너울성 고파 추정

너울성 고파가 발생한 5개의 사상(즉, Event No. 1~5)에 대해서 시간 별로 모든 파랑을 대상으로 외해 파랑을 추정하였다. 먼저 스펙트럼을 JONSWAP으로 가정하고 관측 스펙트럼과의 오차의 제곱합이 최소가 되는 최소제곱법(method of least squares)을 사용하여 첨두신장인자( $\gamma$ )를 추정하였다. 사상별 최대파 내습 시 추정된 첨두신장인자는 각각  $\gamma = 0.49, 0.76, 1.05, 1.22, 0.86$ 으로 추정되었다. 외해 지점에서 추정된 유의파고 최대값은 각 사상 별로  $H_s = 6.07$  m, 4.23 m, 5.73 m, 9.38 m, 7.01 m이며 모든 사상에서 관측값(즉,  $H_s = 4.03$  m, 3.51 m, 3.68 m, 5.41 m, 4.72 m)보다 컸다. 이는 주로 NNE 방향에서 전파하는 고파가 관측지점 근처에서 굴절이 되어 파고가 작아진 것으로 판단된다. 이러한 굴절 경향은 파향이 N에 가까울수록 대체로 크게 나타났다.

Fig. 11에 최대 유의파고 내습 시 주파수 스펙트럼의 관측값과 추정값을 도시하였다. 추정된 스펙트럼이 관측값을 대체로 잘 재현함을 볼 수 있다. 사상 4, 5의 경우  $f = 0.1$  Hz와  $f = 0.2$  Hz 근처에서 관측값이 국부적으로 최대로 나타났다. 이는 파랑간의 비선형 현상으로 나타난 것으로 판단된다. 사상 3의 경우  $f = 0.12$  Hz와  $f = 0.17$  Hz 근처에서 주파수밀도가 국부적으로 최대로 나타났다. 이러한 쌍봉형의 스펙트럼이 관측되는 경우 본 연구에서 사용하는 JONSWAP 스펙트럼으로 이를 정확히 표현하는데 한계가 있다. 스펙트럼의 관측값과 추정값의 총 에너지 양을 비교하기 위하여 다음 식으로 정의되는 상대오차를 사용하였다.

$$RE = \frac{\int_f [S_p(f) - S_o(f)] df}{\int_f S_o(f) df} \times 100(\%) \quad (10)$$

위 식에서 아래 첨자  $o$ 와  $p$ 는 각각 관측값과 추정값을 의미한다. 5개의 사상에 대하여 추정된 스펙트럼의 상대오차는 8.8~10.9% 범위에서 나타났다.

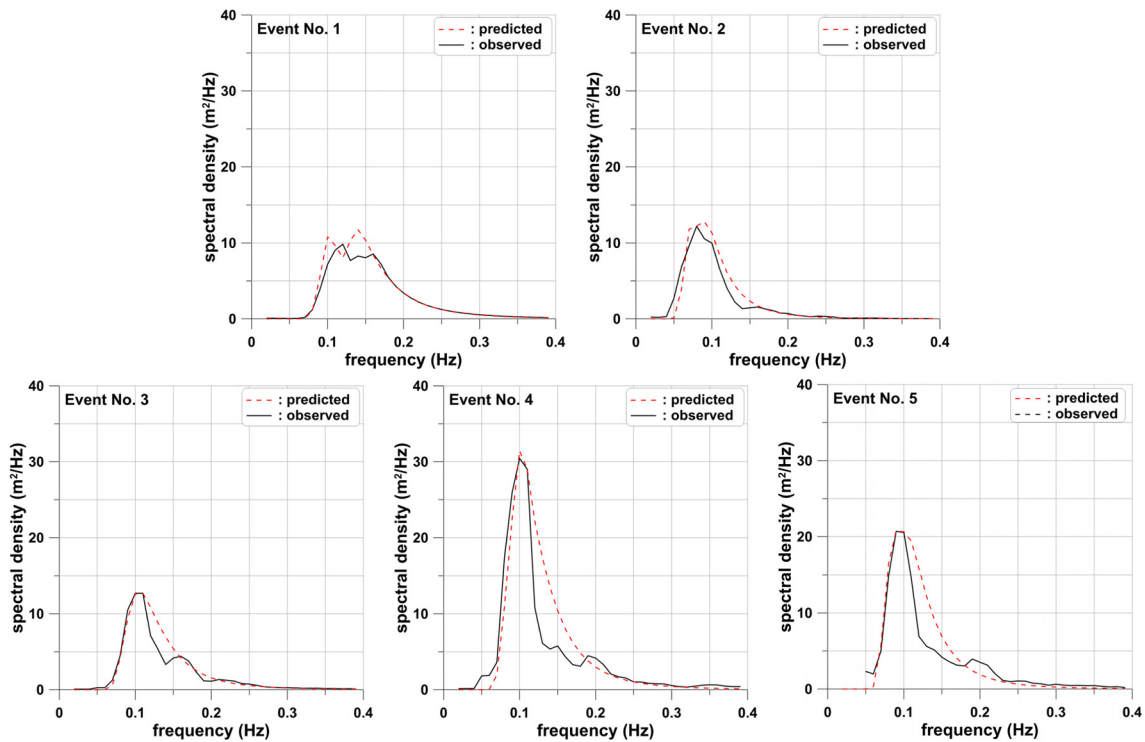


Fig. 11. Observed and predicted spectra at Sokcho.

Table 4. Swell-like high wave data observed at Sokcho and estimated open site

event No.	measurement site				open sea			
	$H_s$ (m)	$T_p$ (sec)	$\theta_p$	$\gamma$	$H_s$ (m)	$T_p$ (sec)	$\theta_p$	$\gamma$
1	4.03	8.50	N29.8°E	0.49	6.07	8.50	N10.2°E	0.49
2	3.51	12.33	N36.1°E	0.76	4.23	12.33	N9.0°E	0.76
3	3.68	9.53	N25.7°E	1.05	5.73	9.53	N3.0°E	1.05
4	5.41	9.75	N28.2°E	1.22	9.38	9.75	N3.5°E	1.22
5	4.72	10.55	N41.8°E	0.86	7.01	10.55	N2.1°E	0.86



관측위치에서 각 사상의 외해 파랑 추정 결과를 Table 4에 제시하였다. 속초에서 관측된 침두파향은  $N25.7^{\circ}E \sim N41.8^{\circ}E$ 로서  $NNE \sim NE$ 에 분포하였다. 또한 추정된 외해의 침두파향은  $N2.1^{\circ}E \sim N10.2^{\circ}E$ 로서  $N \sim NNE$ 에 분포하였다. 따라서, 관측 기간 동안 발생한 너울성 고파는 북쪽과 북북동쪽 사이의 해역에서 발생하여 동해안으로 전파한 것으로 판단된다. 이와 같은 방법으로 5개 사상의 유의파고, 침두파향의 시계열 정보를 이용하여 외해 너울성 고파의 제원을 추정하였고 이를 제4.3절에서 너울성 고파 예측에 이용하였다.

### 4.3 동해안 너울성 고파 예측

너울성 고파 예측은 동일 기간에 검증 가능한 파랑관측 자료가 존재하는 왕돌초 해양 관측소를 대상으로 수행하였다. 왕돌초 예측지점은 수심 15.5 m의 수중암초 지형으로 해안선에서 멀리 떨어져있다.

제4.2절에서 추정한 외해 파랑정보로부터 SWAN모형을 이용하여 왕돌초에 전파되는 유의파고, 침두파향을 예측하였고, 파향선 추적법을 사용하여 파랑이 속초에서 왕돌초까지 도달하는 시간을 예측하였다. 이는 본 연구의 개선된 방법으로서 “SWAN+파향선추적법”이라 명명하였다. 과거에 Ahn et al.(2013)의 연구 방법은 파향선 추적법으로 도달시간 뿐만 아니라 유의파고, 침두파향을 예측하였다. 이를 “파향선추적법”이라 명명하였다. 속초 관측지점의 파랑정보를 이용하여 외해의 파랑정보를 추정하는데 있어서 과거 방법과 본 연구의 방법은 똑같다. 외해 파랑정보로부터 동해안 주요해역의 파랑정보를 추정할 때 과거의 방법은 파향선 추적법을 써서 도달시각, 유의파고, 침두파향을 추정한다. 파향선추적법은 파랑의 천수와 굴절을 예측할 수 있지만 회절, 비선형성, 쇄파를 모의하지 못하여 수심이 아주 얇은 해역에 예측의 정확성이 크게 떨어진다. 반면 본 연구의 방법은 유의파고와, 침두

파향을 추정할 때 SWAN을 써서 추정하여 파랑의 천수, 굴절 뿐만 아니라 회절, 비선형성, 쇄파를 비교적 정확히 모의할 수 있다.

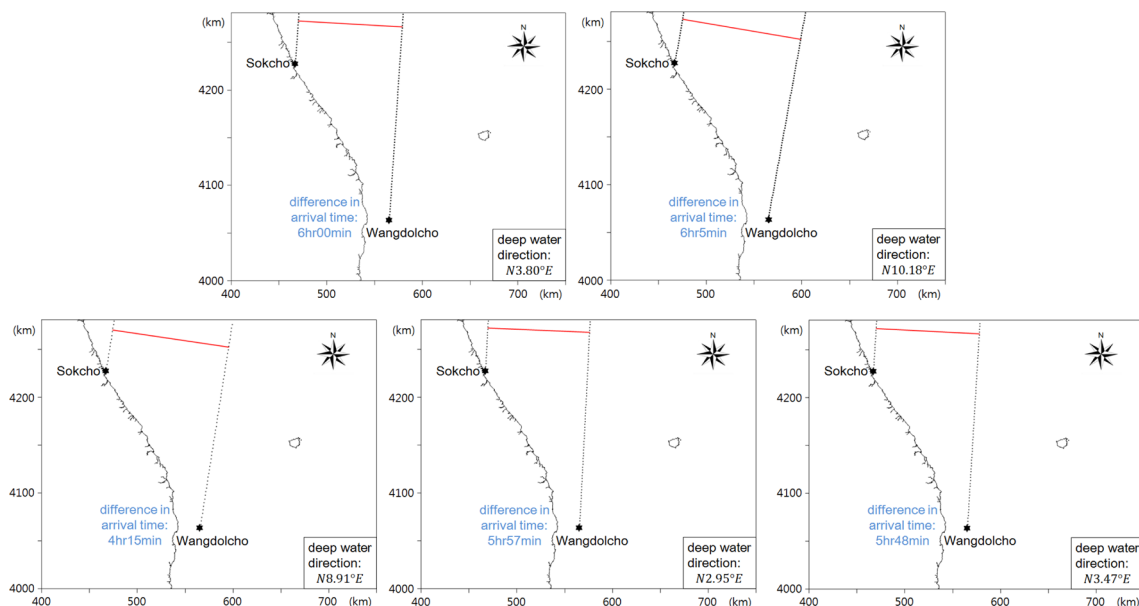
각 사상에 최대유의파고 내습 시 왕돌초에서 “SWAN+파향선추적법”과 “파향선추적법”으로 예측된 파랑 정보와 관측된 파랑 자료를 비교하여 Table 5에 제시하였다. “SWAN+파향선추적법”에 의한 유의파고의 예측치는 관측치와 0.7 m(즉, 13 % 상대오차) 이내의 오차를 보이지만, “파향선추적법”에 의한 예측치는 4.9 m(즉, 91 % 상대오차)로 훨씬 더 컸다.

각 사상에서 추정된 파랑이 속초와 왕돌초에 도달한 시간차를 파봉선(실선) 및 파향선(점선)과 함께 Fig. 12에 도시하였다. 파랑이 속초와 왕돌초에 도달한 시간차의 최소값은 사상 번호 2의 4시간 15분으로 추정된 파랑이 NE계열에 가장 가깝기 때문이다. 이렇게 북동쪽에서 내습하는 너울성 고파의 경우 왕돌초 뿐만 아니라 동해 주요지점의 예측이 가능하다. 다만 파향이 각 지점이 이루는 각보다 큰 경우(너울성 고파의 입사 파향이 E계열인 경우) 파랑이 속초보다 동해 주요지점에 먼저 도달하여 예측이 불가능하며 예측이 가능한 경우에도 도달시간이 짧아 대비하는 데 충분한 시간을 확보 할

**Table 5.** Comparison of predicted swell-like high wave data against observed values at Wangdolcho

event No.	observed value $H_s$ (m)	SWAN +WAVE RAY $H_s$ (m)	WAVE RAY $H_s$ (m)
1	5.37	4.68 (-12.8 %)	8.74 (62.8 %)
2	5.30	4.82 ( -9.1 %)	4.89 (-7.7 %)
3	4.56	4.61 ( 1.1 %)	5.89 (29.2 %)
4	5.40	5.17 ( -4.3 %)	10.31 (90.9 %)
5	5.57	5.03 (-9.6 %)	9.05 (62.5 %)

※ ( ) : relative error compared to observed value



**Fig. 12.** Difference in arrival time of swell-like high waves between Sokcho and Wangdolcho.

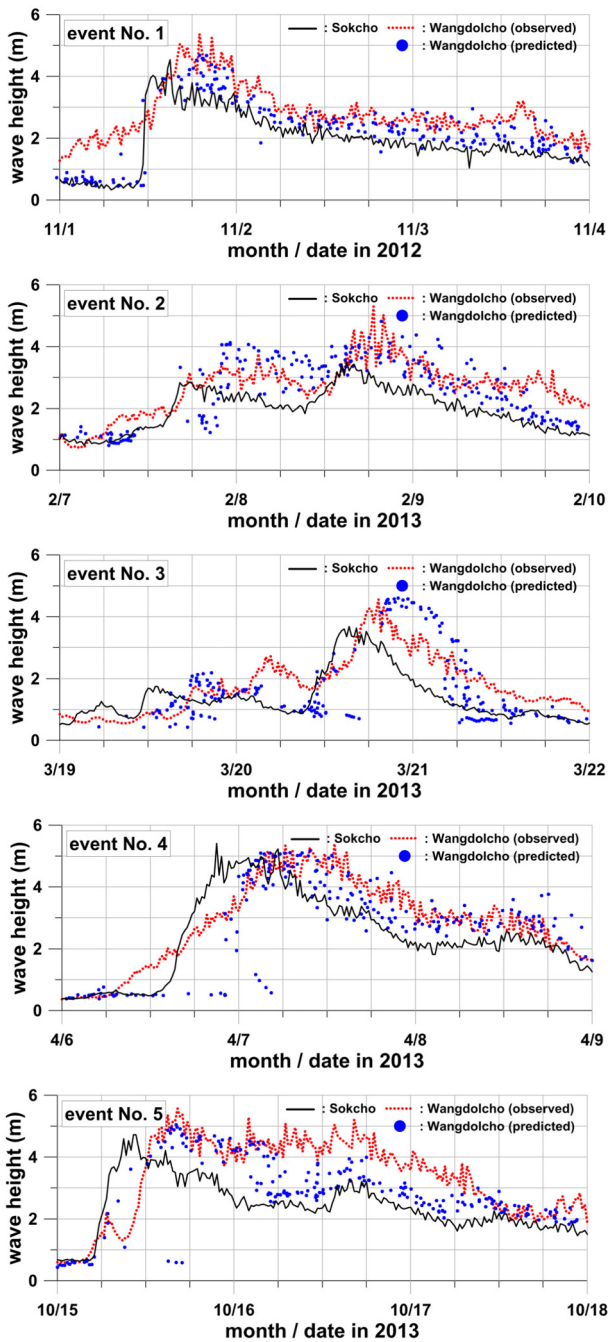


Fig. 13. Time series of significant wave height measured and predicted at Wangdolcho.

수 없다. 울릉도에 파향·파고를 관측할 수 있는 장비가 설치된다면 속초 자료와 함께 동해안 전 해역의 파랑 정보를 알 수 있을 뿐만 아니라 동쪽에서 내습하는 파랑에도 충분한 대비시간을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

“SWAN+파향선추적법”으로 5개 사상에 대한 왕돌초에서의 예측 시계열을 산정하여 왕돌초 파랑 관측자료와 함께 Fig. 13에 도시하였다. 왕돌초 지점의 파랑 출현 시점은 속초 관측시점을 기준으로 본 알고리즘을 적용하여 산정한 왕돌초 파랑 도달시간을 합산하여 산정하였다. 왕돌초 관측위치에서 예측된 파랑은 파고의 증가와 감소, 최대파고 및 출현시점을 대

체로 잘 재현하였다. 다만 유의파고가 작은 구간에서 오차가 크게 나타났다. 이 구간에서는 장거리로 이동한 고파가 관측된 것이 아니고, 속초 부근에서 국지적인 기상요인으로 발생한 것이어서 속초를 지나 왕돌초까지 이동하는 고파를 예측하는 본 연구의 방법으로 정확히 예측할 수 없을 것이다. 이러한 파랑은 본 연구에서 고려하는 너울성 고파가 아니다.

## 5. 결 론

국립해양조사원에서는 2012년 말부터 속초 동방등표 인근에서 파향·파고계인 AWAC 관측장비를 활용하여 유의파고, 침두주기, 침두파향 뿐만 아니라 주파수 스펙트럼과 방향스펙트럼을 실시간으로 관측하고 있다. 본 연구에서는 AWAC에서 관측되는 실시간 파랑 자료를 이용하여 동해안의 주요 지역에 너울성 고파를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 너울성 고파 예측 방법은 다음과 같다. 첫째, 속초 동방등표 근처 수심 18 m 지점에 설치된 파향·파고계에서 관측된 유의파고, 침두주기, 주파향, 스펙트럼 정보로부터 외해의 파랑정보를 추정하였다. 파랑정보를 추정하기 위하여 유의파고, 침두주기, 침두파향, 침두신장인자의 다양한 조건에서 수행하여 DB화한 SWAN 파랑수치모형 결과를 사용하였으며, 이로부터 관측지점과 외해지점 간의 상관관계를 찾았다. 둘째, 추정된 외해의 파랑정보로부터 동해안 주요지역의 너울성 고파를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 너울성 고파 예측은 예측된 파랑을 검증할 관측자료가 존재하는 왕돌초 해역을 대상으로 하였다. 너울성 고파 예측지점은 해안선에서 동쪽 25 km 떨어진 수심 15.5 m 지점을 선택하였다. 대상지역의 파랑 예측에는 유의파고, 침두주기, 침두파향의 경우 SWAN 모형을, 도달시간의 경우 파향선추적법을 사용하였다. 본 연구에서는 2012년 10월 25일부터 2013년 10월 18일 사이에 관측된 파랑 관측자료 중 유의파고 3 m 이상, 침두주기 9초 이상이 발생한 사상에 대해 왕돌초 지역의 너울성 고파를 예측하고, 동일 지점에서 관측된 파랑 시계열과 비교하여 너울성 고파 예측 알고리즘을 검증하였다. 그 결과, 파고의 증가와 감소, 최대파고 및 출현시점을 대체로 잘 재현하였다. 외해에 추정된 주 파향은 N~NNE에 분포하였다. 유의파고가 작은 경우 오차가 크게 발생하였다. 이 경우의 파랑은 국지적인 기상요인으로 발생한 것으로 장거리를 전파하는 너울성 고파를 예측하는 본 연구의 방법으로 예측하는데 한계가 있다고 판단된다.

본 연구에서 개발한 너울성 고파 예측법은 속초의 실시간 관측 자료를 사용하여 동해안의 북쪽과 북동쪽 사이에 위치한 곳에서 발생한 고파를 정확히 예측할 수 있다. 하지만 동해안의 동쪽에 위치한 곳에서 발생한 너울성 고파의 경우 속초를 지나는 파향선이 동해안의 전 해역을 대표하는데 한계가 크다. 또한 속초와 동해안의 다른 지점에 고파가 도달하는 시간이 비슷하여 속초의 관측 자료를 이용하여 다른 지점의 고파를 예측하는 면에서 활용가치가 없다. 울릉도와 같이

동해 먼 바다에 다수의 실시간 관측시설을 두면 다수의 관측 시설을 이용하여 북쪽 뿐만 아니라 동쪽에서 발생한 너울성 고파도 정확히 예측할 수 있을 것이다. 향후 너울성 고파 관측자료를 축적하여 본 연구결과를 보완하고, 국립해양조사원의 실시간 관측 모니터링 등과 연계하면 본 연구가 우리나라 동해안의 너울성 고파의 예측 정확도를 향상하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년 해양수산부의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Ahn, S.J., Lee, B.W., Kwon, S.J., and Lee, C. (2013). Algorithm of Predicting Swell-like Significant Waves in the East Coast of Korea. *J. of Korean Society of Civil Engineers*, 33(6), 2329-2341 (in Korean).
- Booij, N., Ris, R.C., and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *J. of Geophysical Research*, 103(C4), 7649-7666.
- Chapra, S.C. and Canale, R.P. (2006). *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill, New York.
- Goda, Y. and An, E.-S. (1973). On wave characteristics along the East Coast of Korea and some remarks on breakwater design. *J. of Korean Society of Civil Engineers*, 21(1), 78-89 (in Korean).
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, E., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12(A8), 1-95.
- Jeong, W.M and Oh, S.-H. (2009). Abnormally high swells occurred on the East coast in recent several years. 2009 Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 2119-2122 (in Korean).
- Jeong, W.M, Oh, S.-H., and Lee, D.Y. (2007). Abnormally high waves on the east coast. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 19(4), 295-302 (in Korean).
- Jeong, W.M, Oh, S.-H., Ryu, K.-H, and Kim, T.-I. (2008). Characteristics of abnormally high waves on the east coast, February 2008. 2008 Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 2480-2483 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2012). Construction of Real Time Wave Height and Direction Transfer and Analysis System, Report (in Korean).
- Mitsuyasu, H., Tasai, F., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., and Rikiishi, K. (1975). Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. of Physical Oceanography*, 5(4), 750-760.
- Munk, W.H. and Arthur, R.S. (1952). Gravity Waves. 13. Wave Intensity along a Refracted Ray. National Bureau of Standards Circular 521, Washington D.C., 95-108.
- Oh, S.-H., Jeong, W.-M., Lee, D.Y. and Kim, S.I. (2010). Analysis of the reason for occurrence of large-height swell-like waves in the east coast of Korea. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 22(2), 101-111 (in Korean).
- Suh, K.-D., Kwon, H.-D., and Lee, D.-Y. (2010). Some statistical characteristics of large deepwater waves around the Korean Peninsula. *Coastal Engineering*, 57, 375-384.

원고접수일: 2014년 2월 6일

수정본채택: 2014년 6월 16일(1차)

2014년 6월 24일(2차)

게재확정일: 2014년 6월 25일